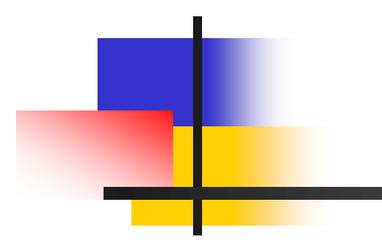


Meet up Chubu vol.46 モビリティ with Map-NAGOYA



移動体・産業機械における 知能化モータドライブの紹介

中部大学 工学部 ロボット理工学科
講師 河村 尚輝

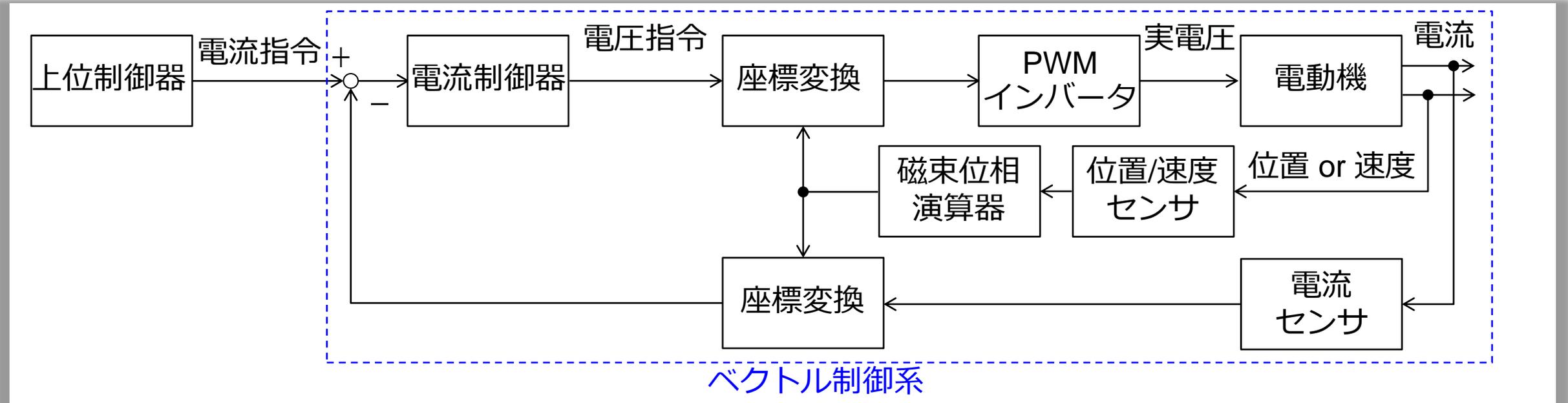
naoki-kawamura@fsc.chubu.ac.jp

目次

- 概論
- 適応・学習制御の概要
 - CE原理
 - DyCE原理
 - フィードバック誤差学習法
- 適用例
 - (CE + 回転座標変換) IMの一次抵抗・速度同時推定系
 - (DyCE) IPMSMの位置・q軸インダクタンス同時推定系
 - (DyCE, フィードバック誤差学習) IPMSMの位置センサレス位置決めサーボ系
- DREMに基づく適応モデル予測電流制御系の紹介

一般的なモータドライブシステムの構成

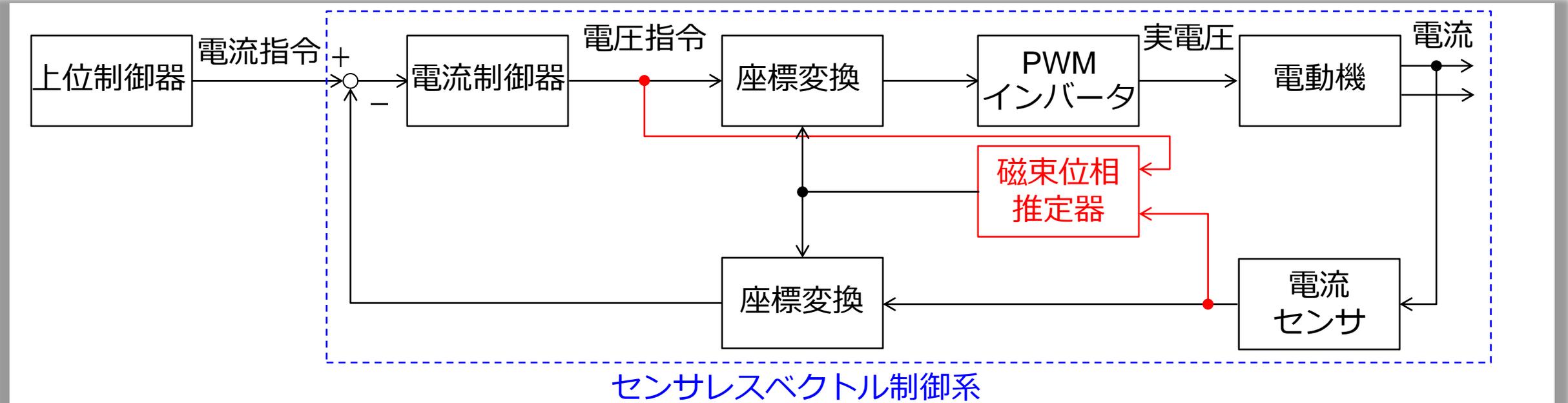
■ ベクトル制御を用いた電動機駆動システム



- 過電流防止の観点から電流センサはほぼすべてのシステムで使用
- 位置/速度センサの使用による高コスト化, 信頼性の低下, システムの大形化
 - 電動機によってはセンサ価格>電動機価格, センサは電子回路を用いるため耐環境性が低い
- 低コスト化, 耐環境性向上, 小形化の要求からセンサレスベクトル制御が要求

センサレス化

■ センサレスベクトル制御を用いた電動機駆動システム

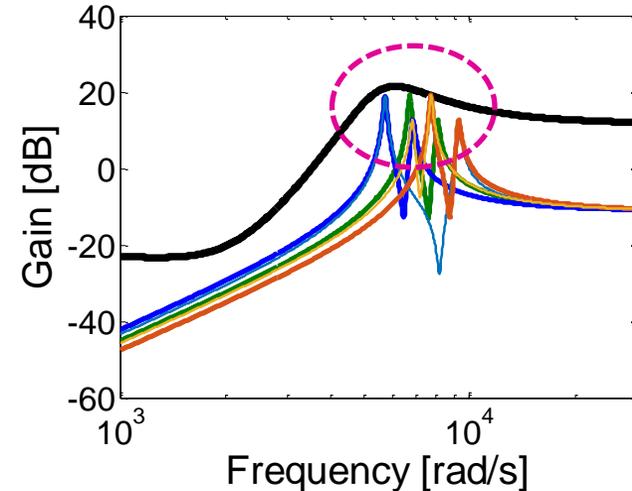


- 電圧/電流応答から電動機の**数式モデル**に基づき電動機の磁束位相を推定
 - 電動機の**電氣的パラメータ**が変動した場合、**磁束位相推定誤差**が生じるため最悪の場合**脱調**
- 各制御器は電動機の**数式モデル**を用いて設計
 - **経年劣化や温度変化**などにより設計時と電動機のパラメータが異なる場合、**制御性能が劣化**

パラメータ変動補償法

■ ロバスト制御

- 時不変な制御器パラメータ
- 最も変動が大きい場合を対象に設計
- 変動の見積もりによっては保守性大
- 変動の情報が事前に必要
- 一般的に線形制御器で構成



最も変動の影響が大きい部分を囲むように
重み関数をチューニング

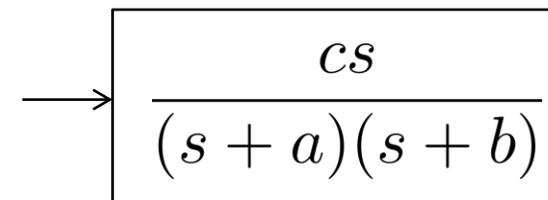


事前に周波数特性を測定する必要がある

変動を含む対象のゲイン特性の例

■ 適応/学習制御

- 時変な制御器パラメータ
- 時々刻々と制御器が自律学習
- モデルに依存しないので、保守性小
- 事前の変動の情報は不要（位相情報は必要）
- 非線形制御器となるため理解が難しい



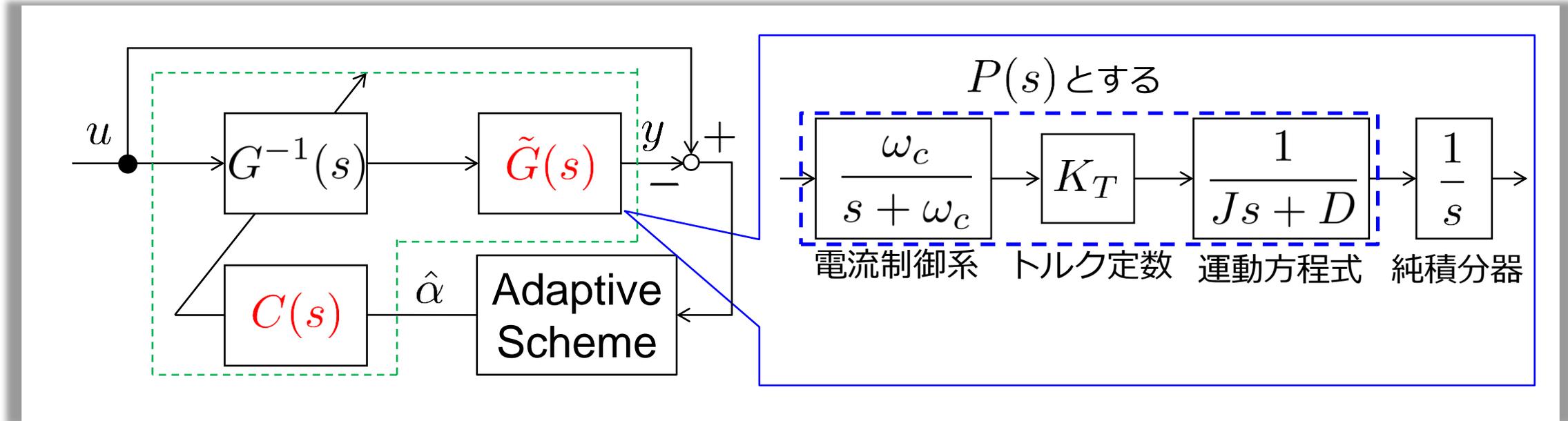
分母次数:2, 分子次数:1
最大位相特性: $|90^\circ|$

制御対象の次数さえわかれば設計可能
 a, b, c のようなパラメータは未知でもよい

事前情報を使える場合⇒ロバスト制御, 使えない場合⇒適応/学習制御

位置センサレス位置決めサーボの例

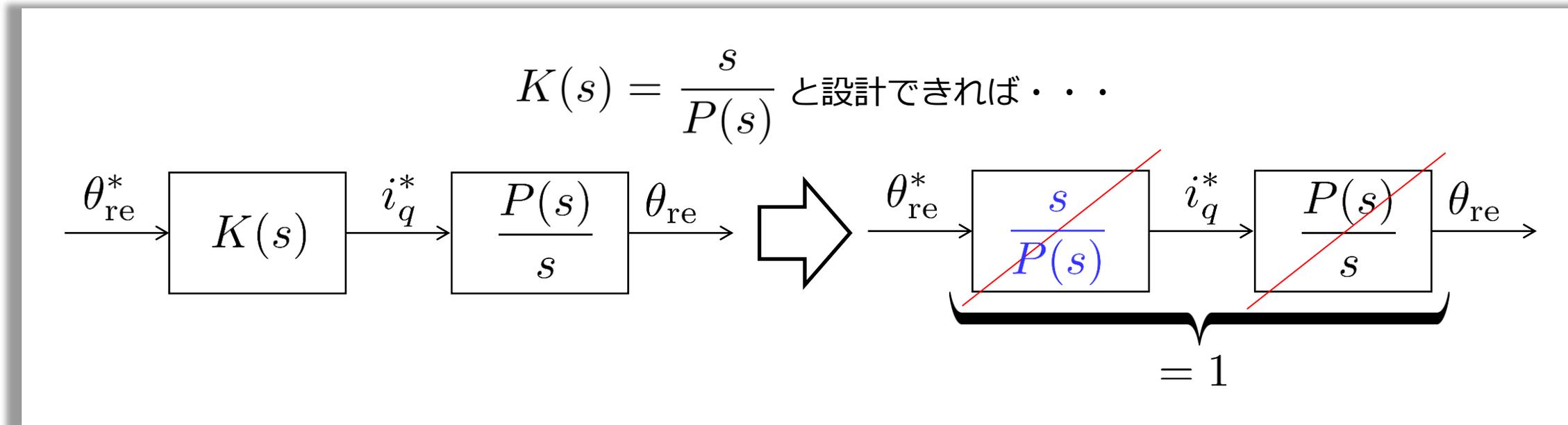
- 位置センサレス位置決めサーボの基本構成



- 制御対象の位相遅れが 90° 以上の場合，正帰還となり不安定化
- 電圧方程式，運動方程式，速度から位置への純積分器により 270° の位相遅れ
- DyCE原理に基づき安定化を図る

位置制御器設計

- 理想的な位置制御器 . . . **制御対象の逆関数**



- 位置指令から位置までの伝達関数が1となるため, 指令値に完全追従
- **コントローラ的设计には制御対象のモデル化が必要**

CE原理（確定性等価原理）

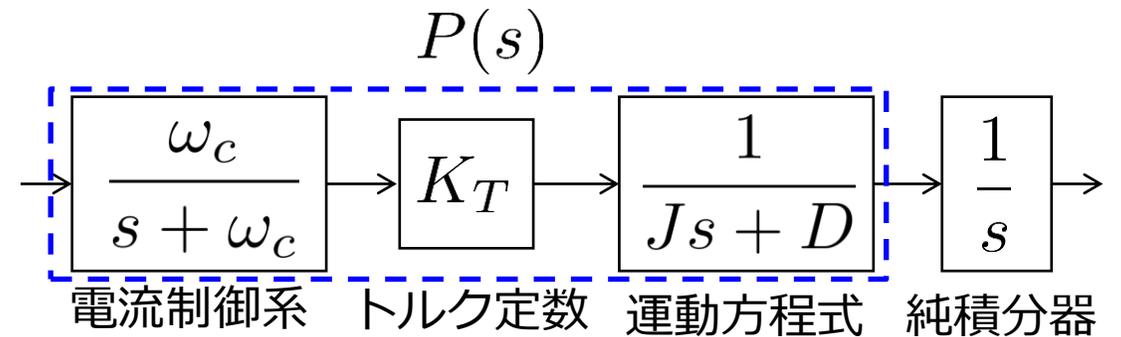
- CE原理とは・・・
 - パラメータを逐次推定 + 推定途中であったとしても真値とみなして制御入力を生成する原理
 - ※センサレス制御も推定位置や速度を真値とみなして制御するのでCE原理です。

対象は三次系のため、理想的な制御入力は逆関数から

$$u = (\alpha_2 s^3 + \alpha_1 s^2 + \alpha_0 s) \theta_{re}^*$$

未知パラメータを推定値に置換して

$$u = (\hat{\alpha}_2 s^3 + \hat{\alpha}_1 s^2 + \hat{\alpha}_0 s) \theta_{re}^*$$



- 環境変動等によりパラメータは時々刻々と変化
- チューニングをして最適化，つまり適応・学習制御によるパラメータ推定が必要

CE原理に基づいた制御入力

■ CE原理に基づく制御入力

$$u = (\hat{\alpha}_2 s^3 + \hat{\alpha}_1 s^2 + \hat{\alpha}_0 s) \theta_{re}^* = \begin{bmatrix} \hat{\alpha}_2 \\ \hat{\alpha}_1 \\ \hat{\alpha}_0 \end{bmatrix}^\top \begin{bmatrix} \dot{a}^* \\ a^* \\ \omega_{re}^* \end{bmatrix} = \hat{\alpha}^\top \dot{\xi}$$

$\hat{\alpha}$: パラメータ推定値ベクトル, $\dot{\xi}$: パラメータ回帰ベクトル

■ 制御出力は

$$\theta_{re} = \frac{P(s)}{s} \hat{\alpha}^\top \dot{\xi} \xrightarrow[\text{より推定値を消去すると}]{\Delta\alpha = \hat{\alpha} - \alpha} \theta_{re} = \theta_{re}^* + \frac{P(s)}{s} \Delta\alpha \dot{\xi}$$

- $P(s)/s$ は制御対象, $\dot{\xi}$ の各成分は指令値なので,
- 位置制御誤差は主に $\hat{\alpha}$ のパラメータミスマッチにより発生

CE原理に基づいた制御入力

■ CE原理に基づく制御入力と出力

- 位置制御誤差は主に $\hat{\alpha}$ のパラメータミスマッチにより発生

$$\theta_{\text{re}} - \theta_{\text{re}}^* = \frac{P(s)}{s} \Delta\alpha \dot{\xi} \Rightarrow \begin{array}{l} \text{位置制御誤差} \propto \text{パラメータ誤差} \\ \dot{\xi} \text{ が三次元平面を張っていれば, 必ずパラメータ誤差は零になる} \\ \Rightarrow \text{Persistently Excitation: PE 性} \end{array}$$

$\hat{\alpha}$: パラメータ推定値ベクトル, $\dot{\xi}$: パラメータ回帰ベクトル

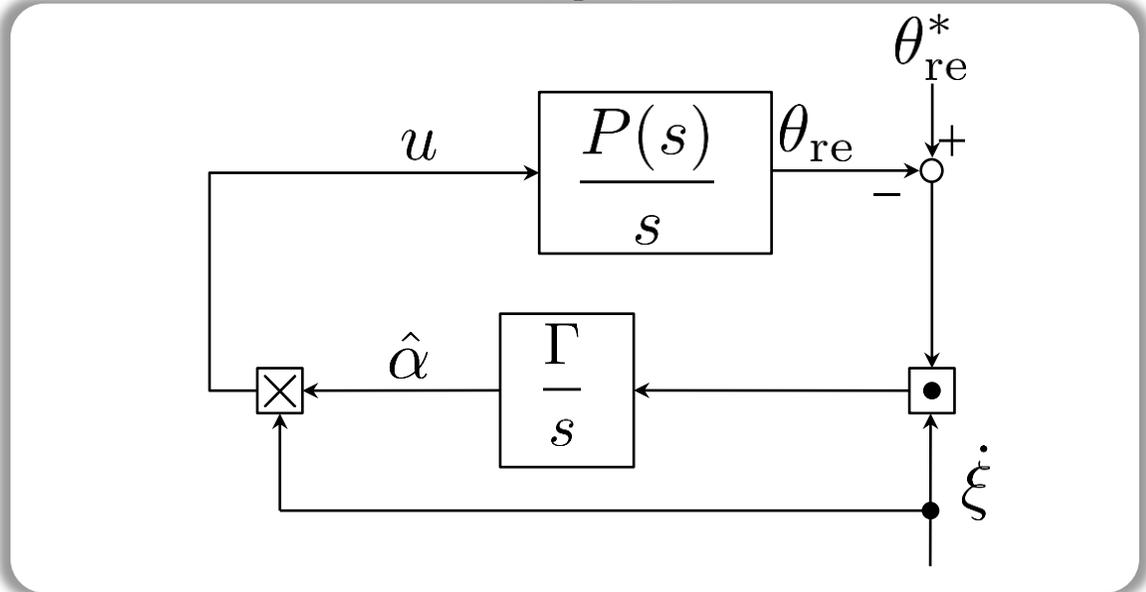
■ 位置制御誤差とパラメータ回帰ベクトルの積より適応則を構成

$$\begin{bmatrix} \hat{\alpha}_2 \\ \hat{\alpha}_1 \\ \hat{\alpha}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{s} \begin{bmatrix} \gamma_2 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_1 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{a}^* \\ a^* \\ \omega_{\text{re}}^* \end{bmatrix} \quad (\theta_{\text{re}}^* - \theta_{\text{re}}) = \frac{\Gamma}{s} \dot{\xi} \Delta\theta_{\text{re}}$$

$\hat{\alpha}$: パラメータ推定値ベクトル, $\dot{\xi}$: パラメータ回帰ベクトル, Γ : 適応ゲイン行列

DyCE原理に基づく適応位置サーボシステム

CE原理



制御入力

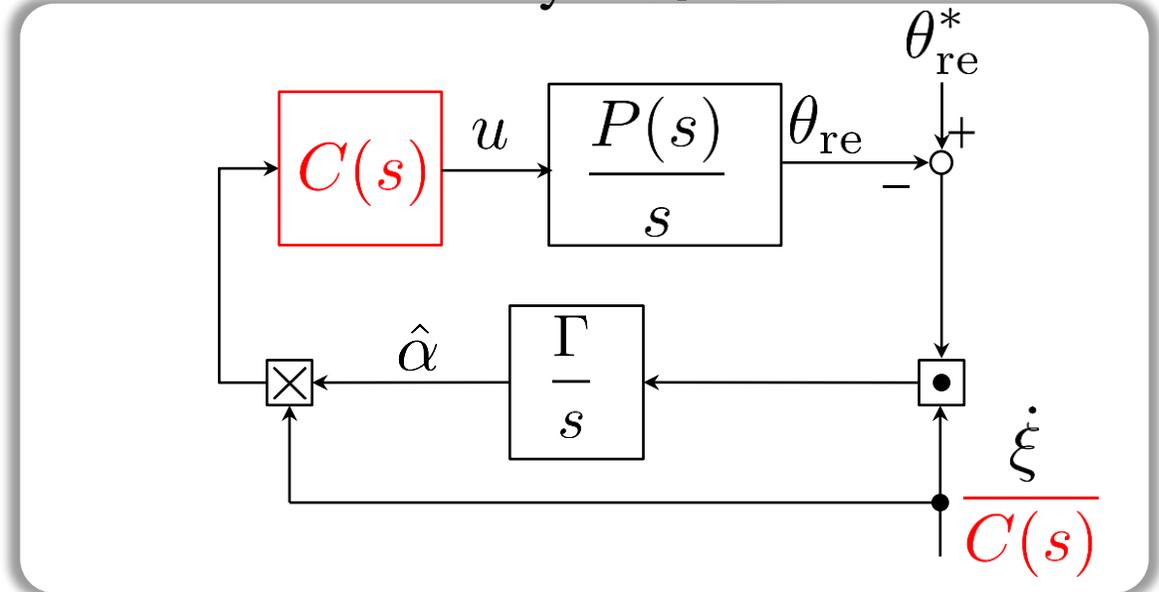
$$u = \begin{bmatrix} \hat{\alpha}_2 \\ \hat{\alpha}_1 \\ \hat{\alpha}_0 \end{bmatrix}^\top \begin{bmatrix} \dot{a}^* \\ a^* \\ \omega_{re}^* \end{bmatrix}$$

適応則

$$\begin{bmatrix} \hat{\alpha}_2 \\ \hat{\alpha}_1 \\ \hat{\alpha}_0 \end{bmatrix} = \frac{\Gamma}{s} \dot{\xi} \Delta\theta_{re}$$

前向き伝達関数の相対次数3
正帰還となり不安定化

DyCE原理



制御入力

$$u = s(Ks + 1) \begin{bmatrix} \hat{\alpha}_2 \\ \hat{\alpha}_1 \\ \hat{\alpha}_0 \end{bmatrix}^\top \begin{bmatrix} \dot{a}^* \\ a^* \\ \omega_{re}^* \end{bmatrix}$$

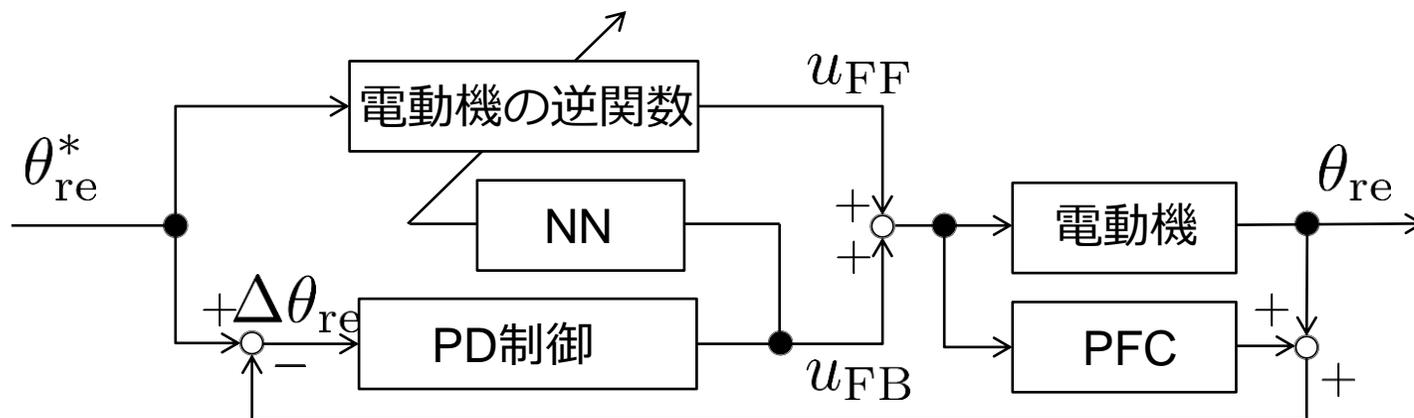
適応則

$$\begin{bmatrix} \hat{\alpha}_2 \\ \hat{\alpha}_1 \\ \hat{\alpha}_0 \end{bmatrix} = \frac{\Gamma}{s} \frac{\begin{bmatrix} a^* \\ \omega_{re}^* \\ \theta_{re}^* \end{bmatrix}}{Ks + 1} \Delta\theta_{re}$$

前向き伝達関数の相対次数1
負帰還となり安定となる

フィードバック誤差学習 (FEL)

位置決め制御系 (簡単のためにセンサレス制御部は省略)



理想的なフィードフォワード制御器

$$u_{FF} = (\hat{\alpha}_2 s^3 + \hat{\alpha}_1 s^2 + \hat{\alpha}_0 s) \theta_{re}^*$$

フィードバック制御器

$$u_{FB} = (sK_D + K_P) \Delta\theta_{re}$$

- FELではFF制御器とFB制御器による二自由度制御系を構成
 - FF制御器で推定パラメータを用いて理想的な指令値を生成
 - FB制御器が動作している → 推定したパラメータに誤差があるとみなす
- FB制御器出力が零となるようにニューラルネットワーク (NN) でパラメータを学習
 - PFC (1次のLPF) とPD制御器により前向き伝達関数の相対次数は1となる

NNの構成

■ 添え字の定義

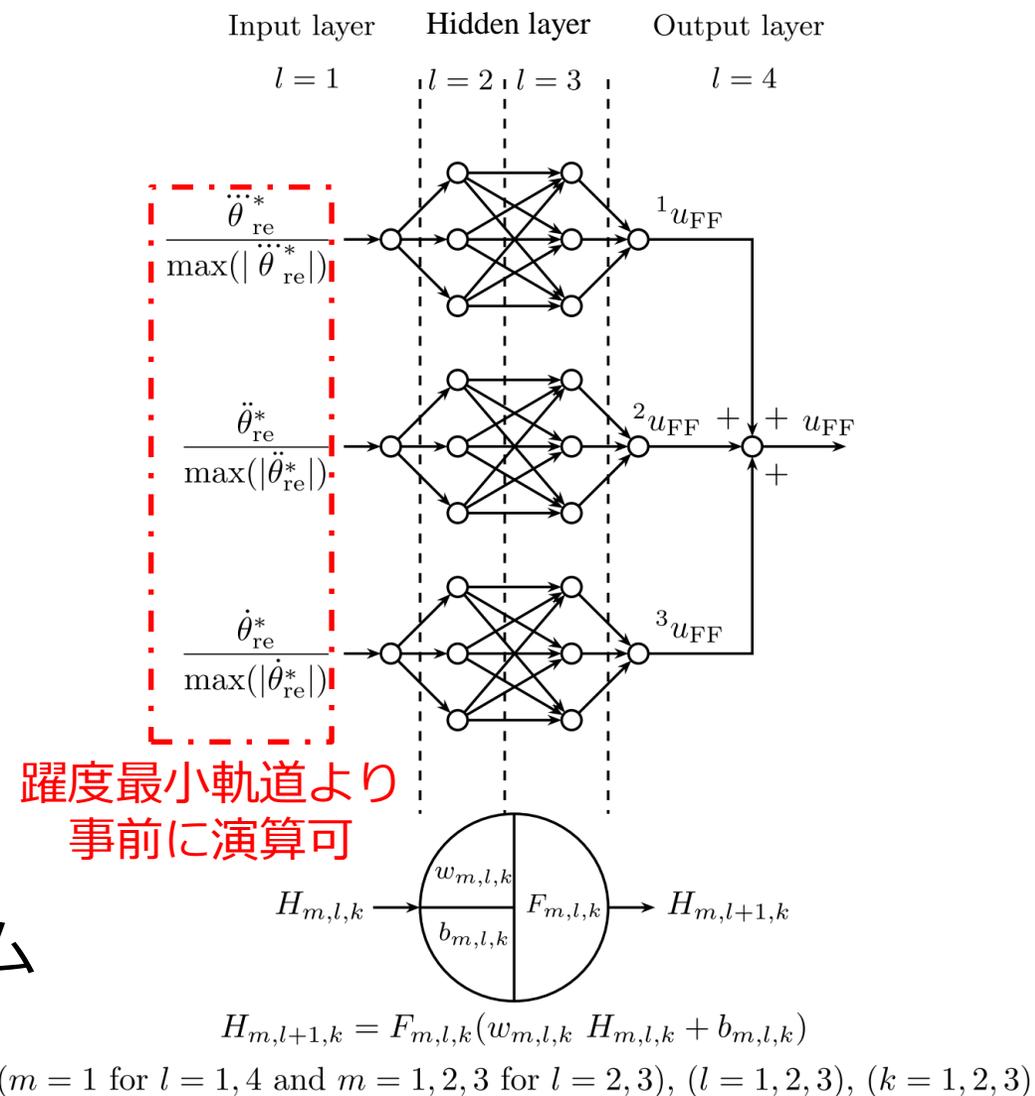
- $x_{m,l,k}$: m-th node in the l-th layer of the k-th sub-NN

■ 各回帰信号に対して1つずつNNを構成

- ${}^1u_{FF}$ は適応制御における $\hat{a}_2 \dot{a}^*$ に対応している
- 演算量低減のために1入力1出力のNNを3つ構成

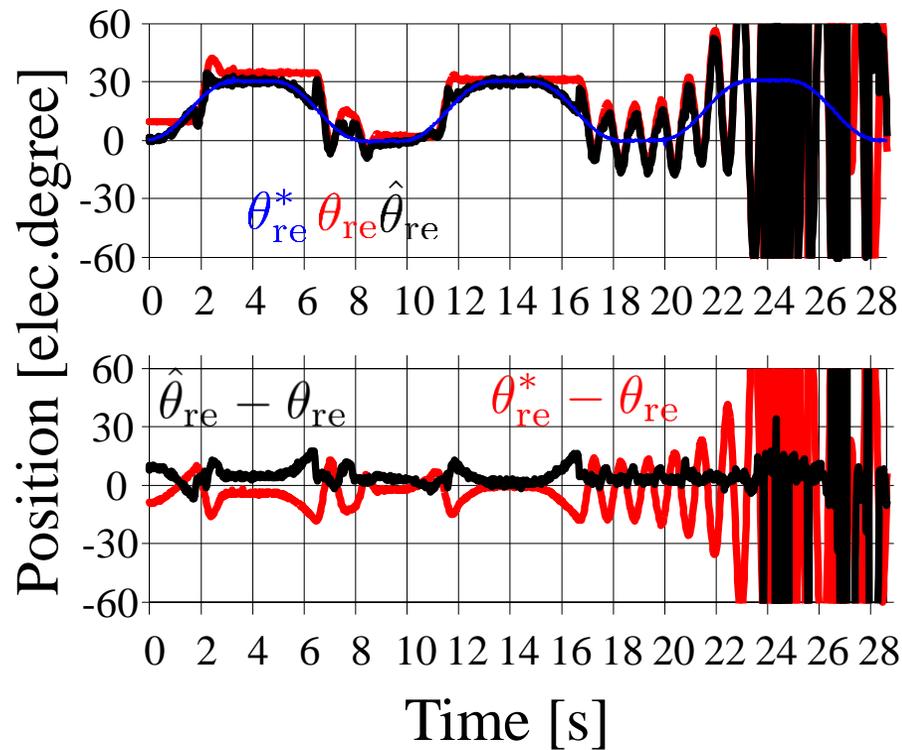
■ 活性化関数 $F = \tanh(\cdot)$

- 重み $w_{m,l,k}$ とバイアス $b_{m,l,k}$ の更新には一般的なバックプロパゲーションアルゴリズムを使用

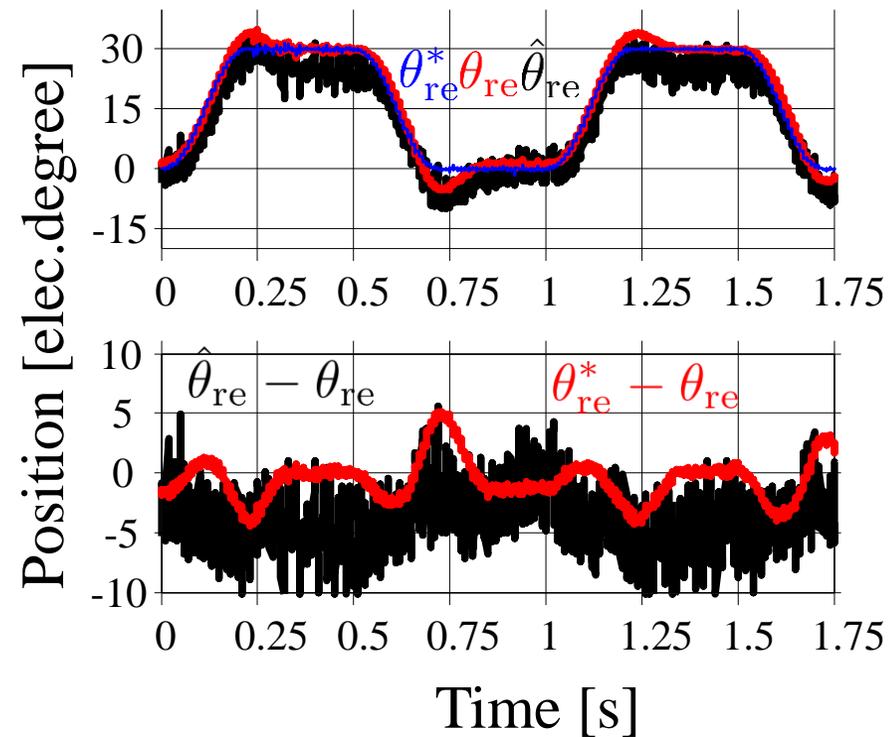


実験結果 (CE, DyCE原理)

- 250msで30°移動, 停止, -30°移動, 停止を繰り返す位置決め指令



(a) CE原理

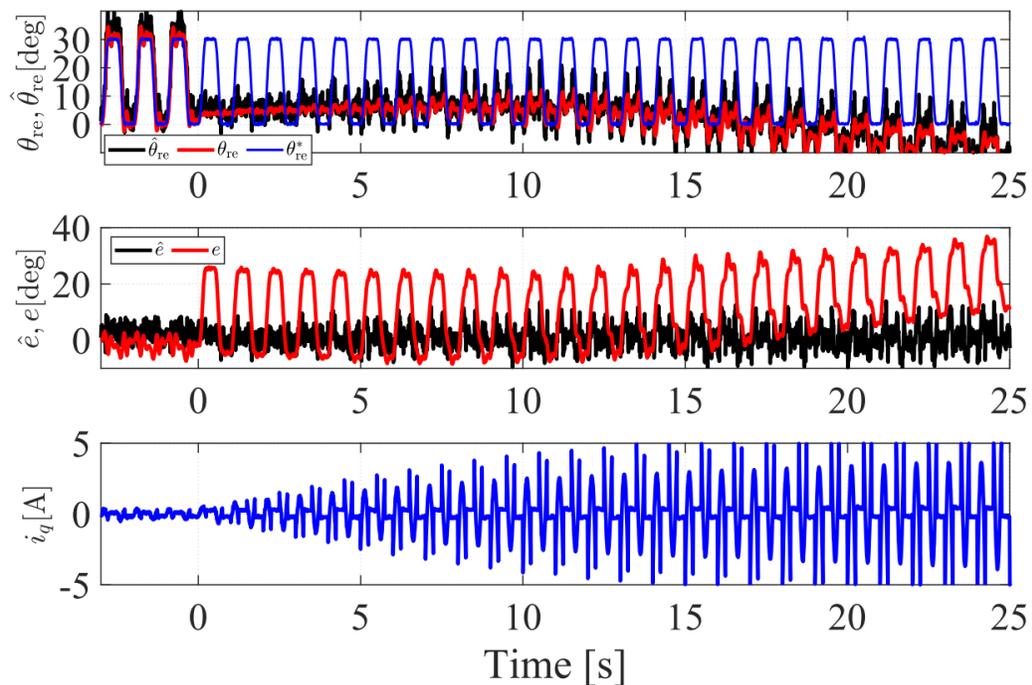


(b) DyCE原理

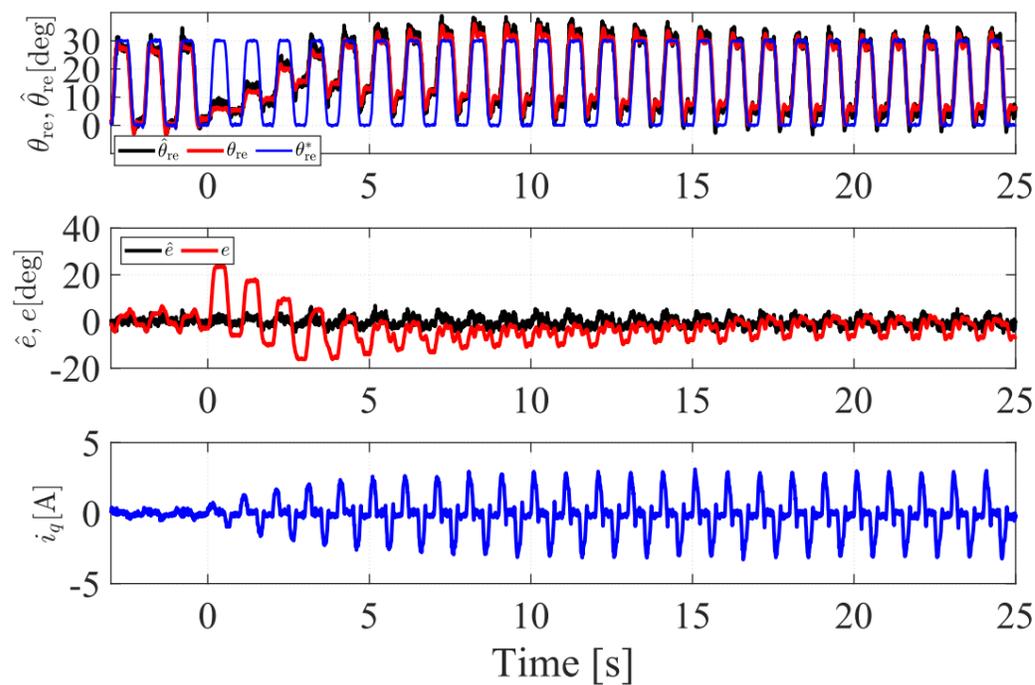
- 従来法においては, 位相遅れが270°のため不安定化
- 提案法においては, 位相遅れを90°に補償しているため安定な位置決めが実現可能
- 提案法により, 簡易位置決め用途における位置決めサーボシステムの高性能化が可能

実験結果 (FEL)

- 250msで30°移動, 停止, -30°移動, 停止を繰り返す位置決め指令 + 500%の慣性変動を模擬



(a) DyCE原理



(b) FEL

- 適応制御においては, モデル化していない外乱には対応できないため不安定化
- NNにおいては, NNが外乱をも推定するため安定な位置決めが実現可能

まとめ

- パラメータ変動の影響はモータの制御性能・安定性に大きく影響
- 適応/学習制御によるパラメータ変動の補償が必須
- 安定なパラメータ推定を実現する適応制御・学習制御制御法を紹介
- 最終的にはすべての電動機パラメータが不要な制御系の実現が課題
 - 全運転条件においても安定運転可能
 - (なるべく) 簡易なアルゴリズムで実現可能なことが理想